

УДК 524.312.7:524.386

ОТКРЫТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАССИВНОЙ ЗАТМЕННОЙ ЗВЕЗДЫ GSC 2143 1307

© 2026 А. С. Волкова^{1*}, И. М. Волков^{1**}¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 30 октября 2025 года; после доработки 7 мая 2026 года; принята к публикации 18 июня 2026 года

Открытая нами новая затменная короткопериодическая звезда с эллиптической орбитой GSC 2143 1307 ($V = 14^m24$, $P = 1^d85$, $e = 0.12$, B3 V + B5 V) оказалась молодой массивной системой с быстрым апсидальным вращением. Впервые получены следующие абсолютные параметры компонентов: $T_1 = 18\,500 \pm 500$ К, $M_1 = 5.1 \pm 0.5 M_\odot$, $R_1 = 2.55 \pm 0.08 R_\odot$, $T_2 = 16\,200 \pm 500$ К, $M_2 = 4.2 \pm 0.4 M_\odot$, $R_2 = 2.23 \pm 0.08 R_\odot$. Апсидальный период $P_{\text{aps}} = 90.4 \pm 0.05$ лет соответствует в пределах ошибок теоретическому значению при условиях синхронизма между орбитальным и вращательными моментами. Расстояние до системы в соответствии с фотометрическим параллаксом составляет $d = 2.08$ кпк.

Ключевые слова: *звезды: массивные — звезды: двойные: затменные — звезды: вращение — звезды: отдельные: GSC 2143 1307*

1. ВВЕДЕНИЕ

В ходе наблюдений по программе исследования затменных звезд с эллиптическими орбитами (Volkov and Volkova, 2009; Volkov, 2024), в поле звезды V491 Vul была обнаружена новая переменная звезда GSC 2143 1307, показавшая ослабления блеска, характерные для затмений. Она находится на угловом расстоянии $3'5$ от V491 Vul. Поскольку за 16 лет наблюдений данной области нами накоплено большое количество ПЗС-снимков в фотометрической системе $UBVRIC_c$ Джонсона–Казинса, позволяющих измерить новую переменную с приемлемой точностью, мы попытались определить тип переменности и установить значения основных физических параметров.

После обработки всех кадров, на которые попадала новая переменная звезда, мы применили нашу программу поиска периодов, основанную на алгоритме скользящего среднего (Volkov, 2022) и пригодную для любого типа переменности. Данный алгоритм строит фазовые кривые блеска путем перебора периодов в заданном интервале значений. На следующем этапе все наблюдательные точки сортируются по фазам, после чего для каждой из них вычисляется среднее отклонение от значения, интерполированного между группами соседних точек. При достаточно плотном заполнении фазовых

кривых наблюдениями алгоритм работает очень надежно, находя периоды даже для малоамплитудных пульсаций (см. Volkov et al., 2024b; Volkova and Volkov, 2025a).

Установлено, что звезда действительно является затменной. Найден единственный период, равный 1.85 суток; при этом вторичный минимум смещен относительно фазы 0.5 — именно это затрудняло определение периода стандартным для затменных звезд методом. Полученная кривая блеска представлена на рис. 1. За время наших наблюдений фаза вторичного минимума менялась от 0.426 до 0.446. Глубина главного минимума составляет 0^m46 , вторичного — 0^m37 . Продолжительность минимумов примерно одинакова, а это значит, что долгота периастра близка к 180° . Такая ориентация орбитального эллипса неблагоприятна для исследования движения линии апсид, поскольку минимумы как бы застывают в своем крайнем положении. Тем примечательнее, что фаза вторичного минимума за время наших измерений изменилась — это свидетельствует о быстром апсидальном вращении в системе. Направление смещения вторичного минимума на фазовой кривой блеска показано на рис. 1 стрелкой.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наши наблюдения проводились в 2008–2025 гг. в 28 выборочных датах. Журнал наблюдений с

*E-mail: kravts@yandex.ru

**E-mail: hwp@yandex.ru

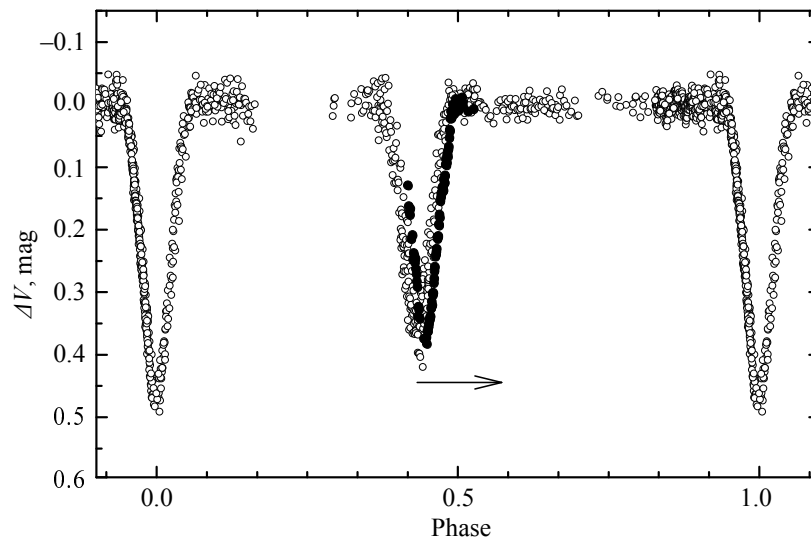


Рис. 1. Кривая блеска GSC 2143 1307, свернутая с сидерическим периодом $P_s = 1^d 850574928$ (см. раздел 6). Фазы искусственно сдвинуты так, чтобы зафиксировать главный минимум. Самые последние по времени наблюдения во вторичном минимуме JD 2460953 — черные точки. Стрелкой показано направление смещения вторичного минимума на фазовой кривой.

указанием обсерваторий и использовавшейся аппаратуры приведен в таблице 1. Подробности о телескопах Симеизской обсерватории ИНАСАН Цейсс-1000 и Цейсс-600 можно узнать из работы Nikolenko et al. (2019), детали инструментальной фотометрической системы — в статье Barabanov et al. (2021).

Обработка кадров ПЗС-матриц выполнялась с помощью программы *Maxim DL 5*. В качестве основной звезды сравнения была выбрана GSC 2143 695 ($V = 11^m 88$, B0 V), близкая к исследуемой звезде по спектральному классу и межзвездному поглощению (см. рис. 2–4, где она обозначена серым квадратом с кружком внутри). Эта звезда расположена на угловом расстоянии $2'8$ от переменной. Из-за схожести спектров и близкого расположения звезд на небе наблюдательные данные оказались малочувствительны к селективному поглощению в атмосфере, поэтому наблюдения можно было проводить при больших воздушных массах.

Изначальная цель наших наблюдений — исследование более яркой и мало изученной затменной переменной V491 Vul ($V = 9^m 97$). Длительность экспозиций подбирали для достижения оптимального отношения сигнал/шум именно для этой звезды. Поэтому, чтобы получить приемлемую точность, большинство отдельных измерений GSC 2143 1307 пришлось усреднить. В полосах BVR_cRIcI усреднение дало точность лучше $\pm 0^m 02$, а для фильтра U — $\pm 0^m 035$.

Нами получено семь $UBVR_cRIcI$ -массивов наблюдений, пригодных для последующей обработки:

поиска решений, определения моментов минимумов, исследования апсидального вращения. Всего на данный момент в нашем распоряжении имеется 3436 точек, из них 1374 в фотометрической полосе V .

Все наблюдения доступны в базе данных CDS через анонимный вход¹⁾ или в архиве VizieR²⁾. Образец данных представлен в таблице 2.

Реальные величины переменной определяются как сумма разностей из таблицы 2 и значений на плато из таблицы 3.

Для наблюдений и редукции данных использована разработанная нами методика (с некоторой модификацией, описанной ниже). Она подробно представлена в наших предыдущих работах: Volkov et al. (2010, 2011), Volkov et al. (2017), Burlak et al. (2018).

3. ОТНОСИТЕЛЬНО-АБСОЛЮТНАЯ КАЛИБРОВКА $UBVRI$ -ДАННЫХ, МЕЖЗВЕЗДНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ

Фотометрическая калибровка GSC 2143 695 — основной звезды сравнения — была выполнена в рамках исследования V491 Vul (Volkova and Volkov, 2026) с привязкой к $UBVRI$ фотометрическим стандартам (Moffett and Barnes, 1979): 113–466 (GSC 543 227), 112–1333 (GSC 511 1008) и 110–340 (GSC 447 541). Привязки сделаны на

¹⁾<https://ftp.cdsarc.u-strasbg.fr> (130.79.128.5).

²⁾<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/other/AstBu/81.361>

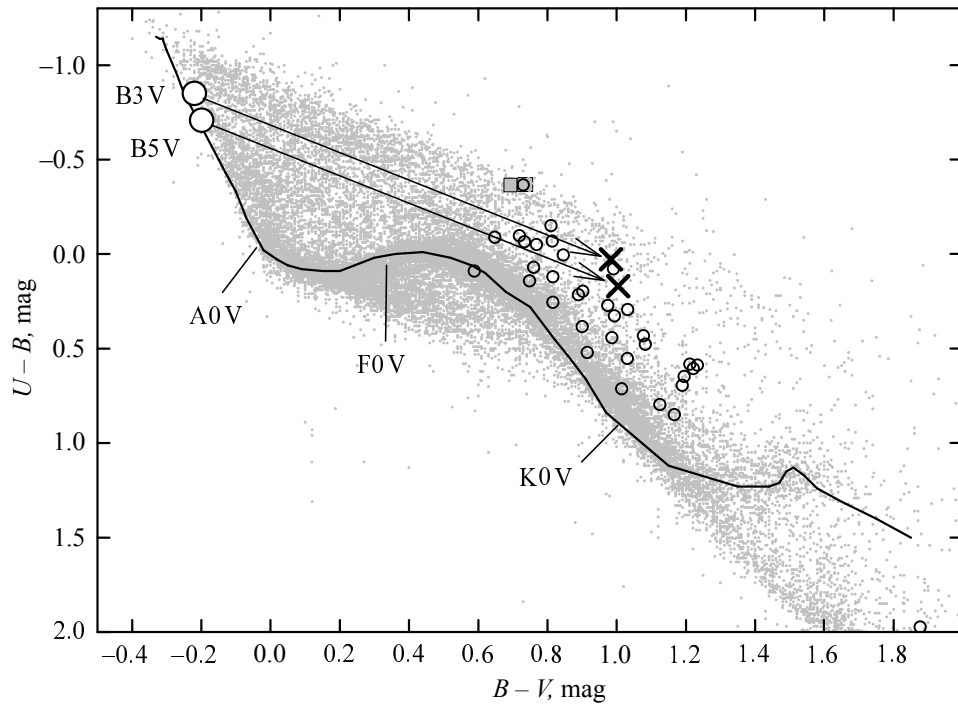


Рис. 2. Двухцветная диаграмма ($U - B$, $B - V$) с окрестными звездами. Косые крестики — компоненты затменной звезды GSC 2143 1307, большие белые кружки — они же, но исправленные за межзвездное покраснение. Серым квадратом отмечена звезда V491 Vul, соседний серый квадрат с кружком внутри — звезда сравнения GSC 2143 695. Маленькие кружки — звезды ближайшей окрестности (см. таблицу 4 из работы Volkova and Volkov, 2026). Серый фон — звезды, имеющие UBV -величины в каталоге Mermilliod et al. (1997). Кривая, соответствующая пятому классу светимости, проведена согласно данным Straižys (1992). Стрелкой показано направление линий межзвездного покраснения для каждого из компонентов GSC 2143 1307.

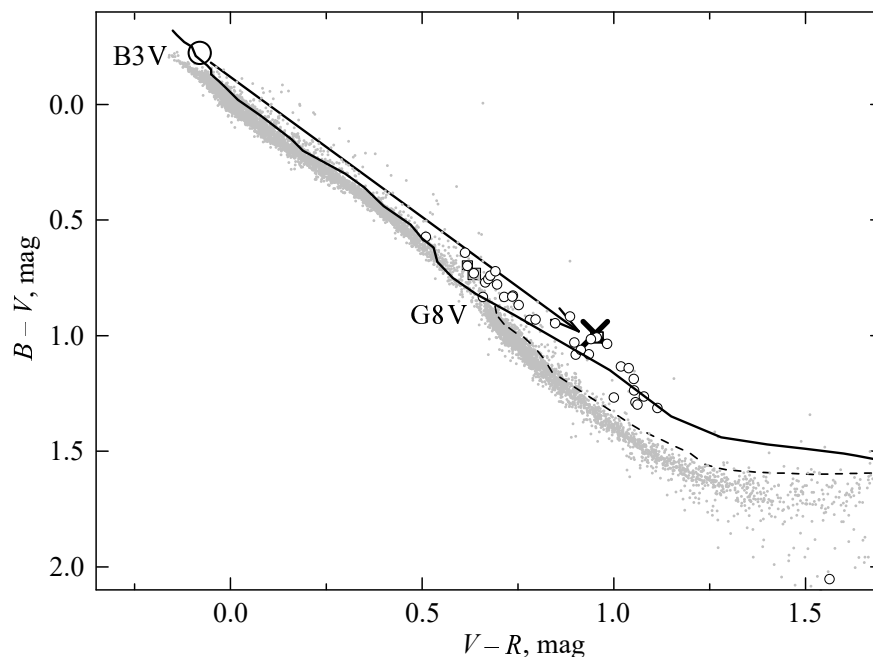


Рис. 3. Двухцветная диаграмма ($B - V$, $V - R$). Все обозначения такие же, как на рис. 2, за исключением того, что серый фон — данные каталога ГАИШ (Kornilov et al., 1991). Сплошная линия соответствует нормальным показателям цвета звезд пятого класса светимости согласно Straižys (1992). Она лежит выше данных ГАИШ вследствие отличия в нуль-пунктах ГАИШ и системы Джонсона. Штриховая линия — нормальные показатели звезд третьего класса светимости согласно Straižys (1992).

Таблица 1. Журнал наблюдений

Год	JD + 2400000	Телескоп	Приемная аппаратура
2009	54942	Ньютон-500, Словакия	ПЗС ST-10XME, $UBVR_cI_c$
2009	54947	"	
2009	55070	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС S3C, V
2010	55364	Цейсс-600, Симеиз	ПЗС VersArray 512UV, $UBVRI$
2011	55824	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС VersArray 1340×1300 , $UBVRI$
2012	56136	Цейсс-600, Словакия	ПЗС G4-9000, V
2012	56147	Цейсс-600, Словакия	ПЗС G4-9000, $UBVR_cI_c$
2012	56159	Цейсс-600, Словакия	ПЗС FLI, $UBVR_cI_c$
2012	56223	Цейсс-600, Симеиз	ПЗС VersArray 512UV, $UBVRI$
2016	57611	АЗТ-5, Научный	ПЗС Apogee Alta U16M, V
2017	57946	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI PL09000, $UBVR_cI_c$
2017	57992	Цейсс-600, Симеиз	ПЗС VersArray 512UV, $UBVRI$
2018	58337	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI PL09000, V
2019	58644	Цейсс-600, Симеиз	ПЗС VersArray 512UV, $UBVRI$
2019	58685	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI PL16803, $UBVR_cI_c$
2019	58690	Цейсс-600, Симеиз	ПЗС VersArray 512UV, $UBVRI$
2019	58713	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI PL16803, $UBVR_cI_c$
2020	59007	Цейсс-600, Симеиз	ПЗС VersArray 512UV, $UBVRI$
2020	59030	"	
2020	59035	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI PL16803, $UBVR_cI_c$
2020	59053	Цейсс-600, Симеиз	ПЗС VersArray 512UV, $UBVRI$
2020	59061	"	
2021	59365	"	
2022	59774	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI PL16803, $UBVR_cI_c$
2023	60109	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI PL16803, V
2023	60129	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI PL16803, $UBVR_cI_c$
2025	60953	Цейсс-1000, Симеиз	ПЗС FLI, V
2025	60954	"	

Таблица 2. Таблица индивидуальных наблюдений. В колонках представлены: (1) — юлианская гелиоцентрическая дата наблюдения, отнесенная к середине экпозиции; (2) — разность звездной величины звезды с ее блеском между минимумами (на плато), уровень которого принят за 0^m0

HJD	Δm , mag
(1)	(2)
2454942.44103	0.0177
2454942.47054	0.1298
2454942.49740	0.1146
2454942.51693	0.0796
2454942.53036	0.1470

обсерватории ИНАСАН в Симеизе с помощью телескопа Цейсс-1000 и $UBVRI$ -фотометра с ПЗС-матрицей Ар 47р (см. таблицы 1, 4). Разность воздушных масс исследуемой области и стандартов не превышала 0.3.

Используя надежные величины звезд-стандартов, для каждой ночи по всему массиву наблюдений мы определили звездные величины звезды сравнения и переменной на плато, а затем сформировали их разности. Последующее усреднение позволило получить инструментальные величины исследуемой звезды относительно звезды сравнения. Наблюдения проводились на ПЗС-приемниках разного типа. Для данного исследования выбрана ПЗС-матрица VersArray 512UV, наблюдения на которой были наиболее многочисленными. Проводились ее неоднократные калибровки по стандартным звездам. Полученные в ходе данной ра-

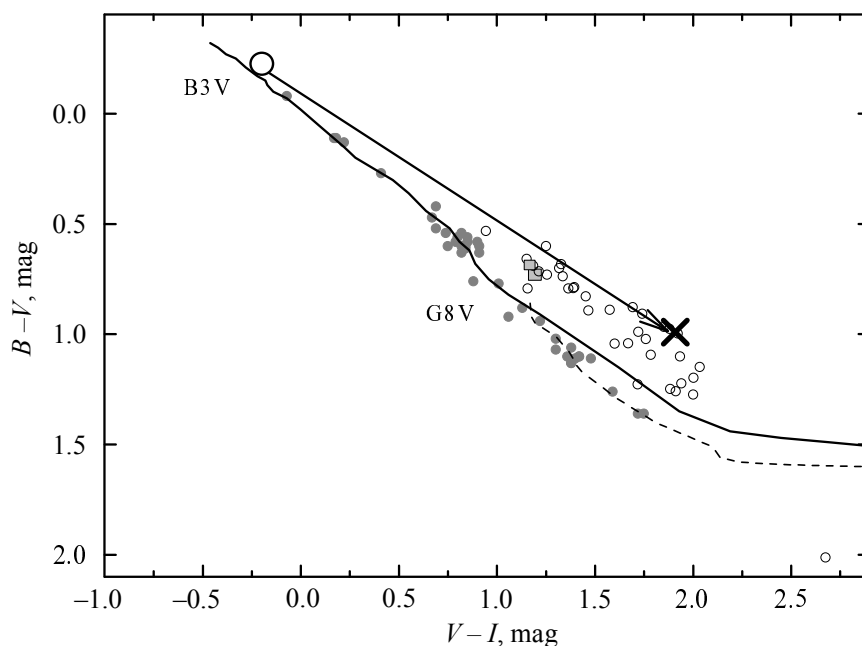


Рис. 4. Двухцветная диаграмма ($B - V$, $V - I$). Обозначения те же, что на рис. 2 и 3. Серыми кружками показаны данные Мендозы для скопления M 67 (Mendoza, 1967).

Таблица 3. Звездные величины GSC 2143 1307 на плато и звезды сравнения в стандартной системе Джонсона–Казинса

Звезда	V , mag	$U - B$, mag	$B - V$, mag	$V - R_c$, mag	$V - R$, mag	$R_c - I_c$, mag	$R - I$, mag	Примечание
GSC 2143 1307	14.238 ± 0.010	0.078 ± 0.043	0.991 ± 0.014	0.551 ± 0.023	0.952 ± 0.021	0.799 ± 0.024	0.958 ± 0.020	Переменная, плато
GSC 2143 695	11.883 ± 0.008	-0.363 ± 0.029	0.698 ± 0.008	0.421 ± 0.020	0.618 ± 0.020	0.483 ± 0.019	0.544 ± 0.016	Звезда сравнения

Таблица 4. Коэффициенты линейного перевода из инструментальной системы в стандартную систему Джонсона для использовавшихся ПЗС и набора светофильтров

Фотометрическая полоса	VersArray 512UV	VersArray 1340×1300	Ap-47p
U	+0.026	+0.040	+0.125
B	+0.150	+0.055	+0.154
V	+0.094	+0.014	+0.050
R	+0.038	0.0	-0.050
I	-0.005	-0.075	-0.046

боты ультрафиолетовые величины звезд проверены с помощью ПЗС-матрицы VersArray 1340 × 1300, которая имеет незначительный, за счет охлаждения жидким азотом, темновой шум и отличную чувствительность в ультрафиолетовом диапазоне. Коэффициенты перехода в стандартную систему

для каждой из ПЗС представлены в таблице 4; коэффициенты A_i вычислены по следующей формуле:

$$\text{Mag} = \text{Mag}_{\text{inst}} + A_i((B_{\text{inst}} - V_{\text{inst}}) - (B_{\text{st}} - V_{\text{st}})). \quad (1)$$

Здесь Mag — величина в определяемой стандартной фотометрической системе, Mag_{inst} — инструментальная звездная величина, полученная из наблюдений. Мы используем показатели цвета $B - V$, так как они определяются из наблюдений с наивысшей точностью. Можно использовать и другие показатели цвета, однако наши эксперименты не выявили преимуществ такого подхода. Более того, для $B - R$ масштабные коэффициенты (см. таблицу 4) становятся меньше, что приводит к снижению точности преобразования. Линейная формула для величин U пригодна только для звезд, близких по показателям цвета и межзвездному поглощению: $\Delta(B - V) < 0.4$, $\Delta E(B - V) < 0.3$. В общем случае необходимо использовать дву-

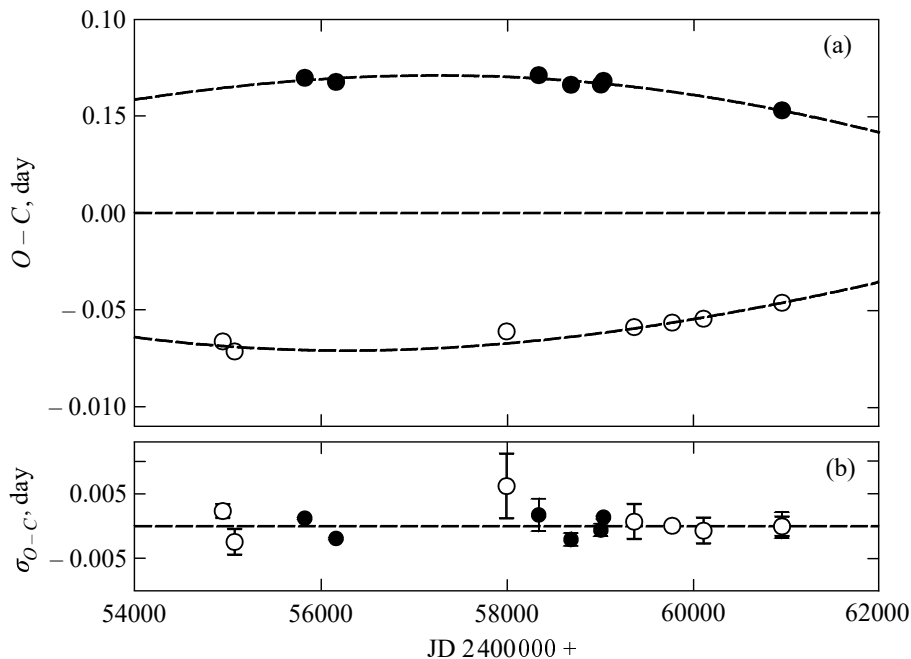


Рис. 5. Апсидальное движение GSC 2143 1307. Заполненные кружки — главные минимумы, пустые — вторичные минимумы. Теоретические кривые проведены в соответствии с данными из раздела 6 и таблиц в нем. На панели (b) представлены в увеличенном масштабе остаточные отклонения от теоретических кривых точек, отмеченных на панели (a). Вертикальными линиями показаны ошибки определения моментов минимумов.

цветные диаграммы ($U - B$, $B - V$), но в данной работе мы этот вопрос не обсуждаем.

Полученные таким образом средние величины переменной на плато и звезды сравнения GSC 2143 695 приводятся в таблице 3. Величины в системе Казинса (привязки в ней не проводились) рассчитаны из величин R , I с помощью формул из работы Taylor (1986) и исправлены за инструментальную систему по формулам, приведенным в Vagabapov et al. (2021). Эти данные важны, так как значительная часть наблюдений выполнена в фотометрических полосах R_c , I_c на телескопе Цейсс-1000 с помощью ПЗС-камеры марки FLI в Симеизской обсерватории ИНАСАН.

Из диаграмм, приведенных на рис. 2–4, наиболее пригодна для определения межзвездного поглощения двухцветная диаграмма ($U - B$, $B - V$), согласно которой $E(B - V) = 1^m21 \pm 0^m02$. По данным обзора Green et al. (2015), для направления на исследуемую область и расстояния до системы получена следующая величина: $E(B - V) = 1^m54^{+0.01}_{-0.04}$. Как и в случае с V491 Vul, наблюдаемое значение оказывается меньше. Данные каталогов представлены на всех двухцветных диаграммах в качестве иллюстрации пригодности кривых нормальных показателей цвета (Straižys, 1992) для определения спектральных классов и межзвездного поглощения исследуемых звезд.

4. РЕШЕНИЕ КРИВЫХ БЛЕСКА И АПСИДАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ

Как видно из рис. 1, на кривой блеска GSC 2143 1307 отсутствуют эффекты близости. Поэтому для поиска решения была выбрана простая модель двух сферических звезд, обращающихся по эллиптической орбите. Наш подход к решению кривых блеска отличался от стандартного алгоритма на основе метода дифференциальных поправок (Khaliullina and Khaliullin, 1984). Связано это с тем, что в ходе предварительного просмотра наблюдательного материала было выявлено очень быстрое апсидальное вращение в системе. Поскольку мы исследовали другую звезду, а именно V491 Vul, то минимумы GSC 2143 1307 наблюдались случайным образом. Нашу программу решения кривых блеска пришлось адаптировать под быстрое изменение долготы периастра (около 4° в год) и включить ее в поиск в качестве независимого параметра. В этом случае полное число независимых параметров увеличивается, что приводит к значительным ошибкам при их одновременном поиске. Учитывая неполноту имеющегося наблюдательного материала, мы постарались обратить этот недостаток в преимущество. Было решено разделить наиболее тесно связанные параметры — эксцентриситет и долготу периастра, поскольку из кривой блеска они определяются только в виде связки $e \cos \omega$. Мы определили отдельно эксцентриситет из кривой

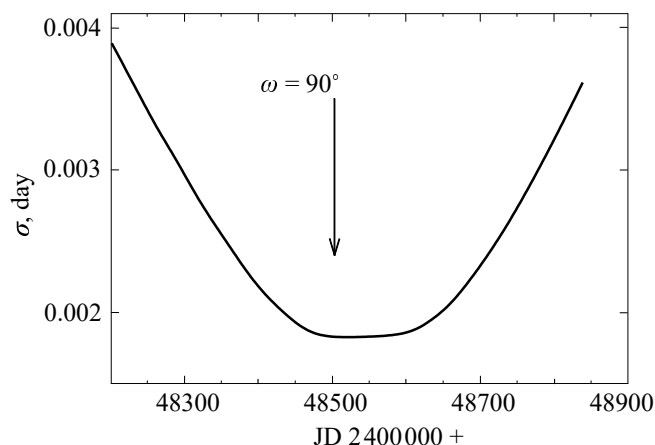


Рис. 6. Ход остаточных уклонений $O - C$ моментов минимумов от наилучшей модели апсидального вращения при разных значениях начальной эпохи, для которой принята долгота периастра $\omega = 90^\circ$. Минимуму невязок соответствует дата $JD = 2448503 \pm 7$.

$O - C$ моментов минимумов. Наши наблюдения охватывают 16 лет — это сопоставимо с периодом апсидального вращения, составляющим 90 лет. При этом полученные данные попадают на экстремум апсидальной кривой $O - C$ (см. рис. 5). Амплитуда в экстремуме жестко определяется эксцентриситетом орбиты двойной системы: чем больше эксцентриситет, тем больше амплитуда. За нуль-пункт по времени принят момент, когда долгота периастра равна $\omega = 90^\circ$, а фаза вторичного минимума в точности имеет значение 0.5. График, иллюстрирующий поиск начальной эпохи, представлен на рис. 6. Значения моментов минимумов определены с помощью программы поиска параметров апсидального вращения (Volkov et al., 2024a).

В остальном способ решения кривой блеска не отличался от применявшегося ранее. Использована разработанная нами методика редукции данных, подробно описанная в предыдущих работах: Volkov et al. (2010, 2011), Volkov et al. (2017), Burlak et al. (2018), Volkov and Kravtsova (2022).

Проверка наблюдений на присутствие третьего света дала отрицательный результат. Но при повышении точности наблюдений — например, за счет увеличения их числа — полученное ограничение $L_3 < 0.03$ может быть пересмотрено в сторону уменьшения.

Наблюдения в других, кроме V , фотометрических полосах не столь многочисленны и распределены по кривой блеска хуже. Они были использованы для определения вклада блеска каждого из компонентов в общий блеск системы в конкретной фотометрической полосе. Эти данные содержат информацию об относительных температурах.

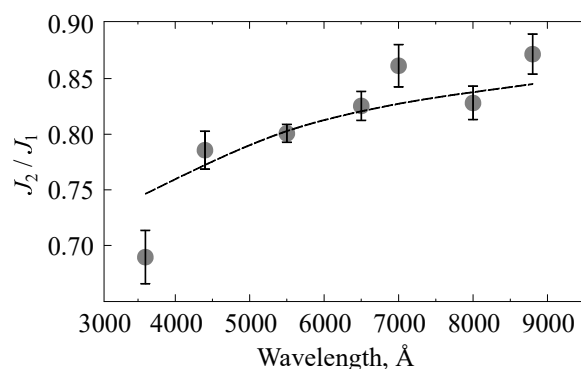


Рис. 7. График зависимости отношения центральных яркостей компонентов от длины волны, построенный по данным таблицы 5. Ошибки представлены вертикальными отрезками. Штриховой линией показана расчетная кривая, построенная для планковского излучения, соответствующего температурам компонентов, и нормированная на среднюю длину волны V . Принятая разность температур компонентов соответствует чернотельному излучению с поправкой по абсолютной величине.

Кривые блеска в фотометрических полосах U , B , R_c , R , I_c , I были решены обычным образом с варьированием одного единственного параметра — относительного блеска звезд. Результаты представлены в таблице 5 и на рис. 7. Расчитанные относительные геометрические параметры модели приведены в таблице 6.

График остаточных уклонений $O - C$ наблюдаемых точек в каждой из фотометрических полос от теоретического решения для соответствующей фотометрической полосы представлен на рис. 8.

5. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТОВ GSC 2143 1307

В случае если спектральные наблюдения недоступны, мы используем для определения масс компонентов косвенный метод (Khaliullin, 1985; Volkov et al., 2017). Полученные физические параметры компонентов приведены в таблице 7. Пригодность данного метода неоднократно нами проверялась путем сравнения масс звезд, рассчитанных с его помощью, с массами, известными из решений кривых лучевых скоростей. Более подробно об этом можно узнать из работы Volkov and Kravtsova (2022).

Найденные значения ускорений свободного падения, температуры и светимости компонентов были использованы для построения эволюционных диаграмм на рис. 9 и 10. Положения компонентов на данных диаграммах не удовлетворяют солнечному химическому составу, а указывают на дефицит металлов. Можно предположить, что звезды с солнечным составом еще не вышли на линию нулевого возраста и находятся под ней. Таких систем пока

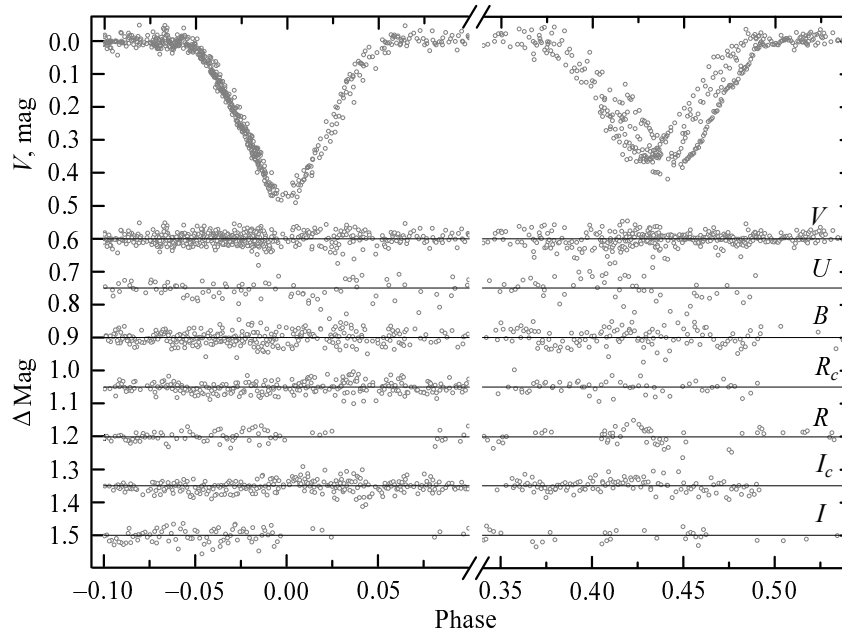


Рис. 8. Наблюдения в полосе V в главном (слева) и вторичном (справа) минимумах, верхняя часть графика. Ниже представлены уклонения $O - C$ наблюдаемых точек от теоретических решений для всех фотометрических полос, выраженные в звездных величинах. Масштаб по вертикали одинаков для всех полос наблюдений, что дает наглядное представление как о точности наблюдений, так и о соответствии их найденной модели.

Таблица 5. Относительные светимости компонентов при одинаковой геометрической модели, которая приводится в таблице 6: $L_1 + L_2 = 1.0$

Параметр	U	B	V	R_c	R	I_c	I
L_1	0.6562 ± 0.0025	0.6262 ± 0.0019	0.6216 ± 0.0009	0.6142 ± 0.0015	0.6038 ± 0.0020	0.6132 ± 0.0017	0.6009 ± 0.0019
J_2/J_1	0.6898 ± 0.0024	0.7859 ± 0.0017	0.8010 ± 0.0008	0.8257 ± 0.0013	0.8617 ± 0.0019	0.8284 ± 0.0015	0.8722 ± 0.0018
Число точек N	179	556	1374	418	214	514	181
σ_{O-C}^m	0.0326	0.0202	0.0168	0.0164	0.0160	0.0170	0.0169

что уверенно не найдено, и, скорее всего, мы имеем дело с дефицитом металлов. Дефицит металлов был нами обнаружен и для системы V491 Vul, принадлежащей области туманности S 87. Расстояние до S 87 оценивается в 1.9–2.4 кпк (Avedisova and Kondratenko, 1984; Paladini et al., 2003; Xue and Wu, 2008), при этом полученные нами фотометрические параллаксы V491 Vul и GSC 2143 1307 соответствуют расстояниям $d = 1.9$ и 2.1 кпк, что не противоречит утверждению о принадлежности этих объектов к туманности и позволяет оценить ее размеры по лучу зрения.

Хотя звезда GSC 2143 1307 является относительно слабой, и точность наших фотометрических наблюдений недостаточна для исследования микропеременности, по измерениям в отдельные ночи нами все же были заподозрены небольшие физические изменения ее блеска. Разброс фото-

метрических измерений во вторичных минимумах на $\pm 0^m002$ больше, что может указывать на переменность главного компонента. На диаграмме из работы De Cat (2002) оба компонента располагаются немного ниже ZAMS, но вблизи зоны неустойчивости звезд типа β Цефея. На данный момент мы не можем с уверенностью утверждать, что звезды пульсируют, но при дальнейших наблюдениях возможную переменность необходимо учитывать (например, при мониторинге на постоянство блеска звезды между минимумами).

6. ИССЛЕДОВАНИЕ АПСИДАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ И ПРОВЕРКА НАЛИЧИЯ СВЕТОВОГО УРАВНЕНИЯ

Построенная нами геометрическая модель позволила точно определить индивидуальные моменты

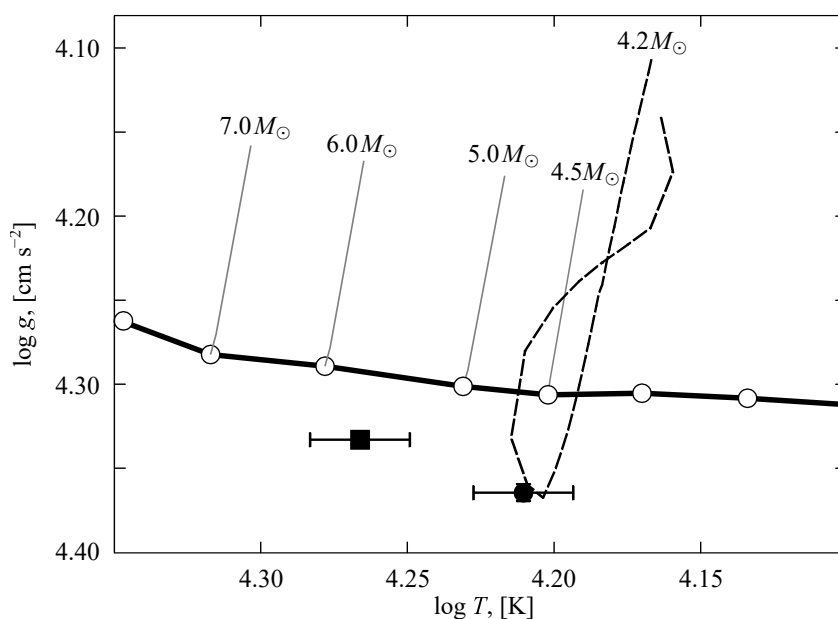


Рис. 9. Эволюционные треки, показывающие зависимость ускорения свободного падения $\lg g$ от температуры звезды, построенные по данным Girardi et al. (2000) для избранных масс звезд, серые линии. Начальная главная последовательность (НГП) показана жирной черной линией. Положение главного компонента обозначено черным квадратом, вторичного — заполненным кружком. Показаны ошибки определения параметров. Штриховой линией обозначен эволюционный трек для звезды, имеющей массу вторичного компонента, включая трек до прихода на НГП.

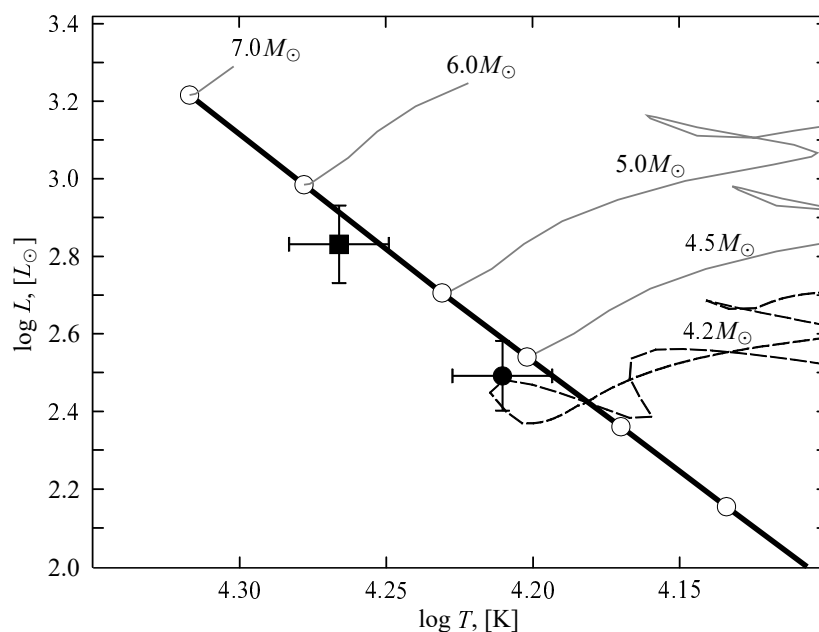


Рис. 10. Зависимость светимости звезд $\lg(L/L_{\odot})$ от температуры для избранных масс. Обозначения те же, что и на рис. 9.

минимумов. При этом варьировались точная дата момента соединения, долгота периастра (с учетом апсидального вращения) и ночные поправки, которые были хоть и незначительными, но не нулевыми. Особенно хотим подчеркнуть, что из-за быстрого апсидального вращения орбиты долгота периастра меняется, поэтому для каждого конкретного минимума ее определяли независимо.

Моменты минимумов, полученные из наших наблюдений, приведены в таблицах 8 и 9. Всего зафиксировано по семь индивидуальных моментов главных и вторичных минимумов.

Средняя ошибка определения моментов главных и вторичных минимумов оказалась одинаковой и составила ± 0.0016 суток. Это существенно выше минимальных ошибок (± 0.0001 суток), получаемых

Таблица 6. Элементы, полученные из решений кривой блеска в фотометрической полосе V . Указаны значения следующих параметров: T_0 — начальная эпоха, r_1, r_2 — относительные размеры компонентов в долях большой полуоси орбиты, i — наклонение орбиты, e — эксцентриситет орбиты, ω — долгота периастра на момент T_0 , L_1 — светимость главного компонента, J_2/J_1 — отношение центральных поверхностных яркостей звезд-компонентов, u_1, u_2 — линейные коэффициенты потемнения к краю, N — число наблюдательных точек, задействованных в решении, σ_{O-C} — среднеквадратичное отклонение наблюдаемых точек от теоретической кривой блеска

Параметр	Значение
T_0 (HJD)	$2457946.44557 \pm 0.00010$
r_1	0.1914 ± 0.0001
r_2	0.1674 ± 0.0001
i , deg	84.07 ± 0.01
e	0.1196 fixed
ω , deg	221.800 ± 0.003
L_1	0.6216 ± 0.0004
J_2/J_1	0.8733 ± 0.0008
u_1	0.275 fixed
u_2	0.291 fixed
N	1374
σ_{O-C}^m	0.0168

нашим методом из наших же наблюдений (Bagaev et al., 2018), а также превышает погрешности, указанные в таблицах 8 и 9. Большой остаточный разброс виден и на графике $O - C$ (рис. 5). Объяснить его исключительно погрешностями наблюдений не удастся. Возможно, есть и другие причины отклонений, например наличие пятен на поверхности затмеваемых звезд. Подобное предполагалось для главного компонента V361 Cam (спектральный класс B5 IV; Volkov et al., 2025) или для V957 Ser (спектральный класс B6 V; Volkov et al., 2024a).

Поиск параметров апсидального движения происходил путем минимизации остаточных отклонений $O - C$ моментов минимумов, как это подробно описано в работе Volkov et al. (2024a). Окончательные значения параметров апсидального вращения и их погрешности представлены в таблице 10.

Получено значение эксцентриситета, немного превышающее то, которое мы определили из решения кривых блеска. Эта поправка незначительна для решения кривых блеска, но важна для анализа

апсидального вращения. Уменьшить эксцентриситет в соответствии с решением кривых блеска невозможно: он гораздо точнее определяется из данных об апсидальном вращении. Поэтому при окончательном поиске геометрической модели мы фиксировали эксцентриситет в соответствии с данными таблицы 10.

Таким образом, решение моментов минимумов позволило нам определить наблюдаемую скорость апсидального вращения: $\dot{\omega} = 3^{\circ}982 \pm 0^{\circ}004$ в год, что соответствует периоду апсидального вращения $U = 90.4 \pm 0.1$ года.

Теперь перейдем к теоретическим оценкам. С помощью расчетов по методике Claret (2004) на основе полученных нами абсолютных параметров системы найдены константы концентрации вещества к центру звезд: $k_{2,1} = 0.0076$, $k_{2,2} = 0.0067$. Далее по формулам из работы Shakura (1985) рассчитана ожидаемая скорость апсидального вращения за счет вращательного и приливного искажения формы звезд-компонентов в условиях синхронизма вращательного и орбитального моментов в периастре: $\dot{\omega}_{\text{class}} = 3^{\circ}79 \pm 0^{\circ}15$ в год. Оценка масс компонентов и точное значение эксцентриситета позволяют с помощью формул Levi-Civita (1937) определить релятивистский вклад во вращение линии апсид: $\dot{\omega}_{\text{rel}} = 0^{\circ}32 \pm 0^{\circ}03$ в год. Все вместе это дает теоретически ожидаемую скорость вращения линии апсид $\dot{\omega}_{\text{theor}} = 4^{\circ}11 \pm 0^{\circ}18$ в год. Данное значение отличается от наблюдаемого всего на три процента. Таким образом, система GSC 2143 1307 является кандидатом в относительно небольшую группу звезд с хорошо измеренным апсидальным движением, в которой уже наступила синхронизация вращательных и орбитальных моментов, но циркуляризация орбиты еще не произошла (см., например, Volkov and Khaliullin, 1999; Volkov and Volkova, 2007). В то же время в ряде систем наблюдается замедление прецессии апсидального эллипса. Долгое время к таким системам относили DI Her (Martynov and Khaliullin, 1980) и α CrB (Volkov, 1993), замедление в которых реально и объясняется гипотезой Шакуры о наклонном вращении компонентов (Albrecht et al., 2009; Volkov, 2005). В системе AS Cam замедленное апсидальное движение, обнаруженное Khaliullin and Kozureva (1983) и неоднократно подтвержденное (см., например Pavlovski et al., 2011), было связано с тем, что при расчетах не учитывалось вековое изменение эксцентриситета орбиты под воздействием третьего тела (Volkov, 2023). По мере постепенного прогресса в точности измерений апсидального вращения, обнаруживается все больше систем как с ускоренным (Volkov and Chochol, 2014; Volkov and Kravtsova, 2022; Volkov et al., 2024c), так и с замедленным апсидальным вращением (Volkov and

Таблица 7. Абсолютные параметры GSC 2143 1307

Параметр	Главный компонент	Вторичный компонент
Масса, $M_{\odot}$	5.1 ± 0.3	4.2 ± 0.2
Радиус, $R_{\odot}$	2.55 ± 0.05	2.23 ± 0.05
Светимость, $\lg(L/L_{\odot})$	2.83 ± 0.1	2.49 ± 0.09
$(B - V)_0$, mag	-0.224 ± 0.02	-0.190 ± 0.02
$(U - B)_0$, mag	-0.855 ± 0.025	-0.696 ± 0.025
Эффективная температура T_{eff} , К	$18\,500 \pm 700$	$16\,200 \pm 600$
Спектральный класс	B3 V	B5 V
Гравитационное ускорение $\lg g$, cm s^{-2}	4.333 ± 0.005	4.364 ± 0.005
Болометрическая поправка BC , mag	-1.714	-1.425
Абсолютная визуальная величина M_v , mag	-0.63 ± 0.03	-0.07 ± 0.05
Межзвездное покраснение $E(B - V)$, mag	1.207 ± 0.02	
Большая полуось a , $R_{\odot}$	13.3 ± 0.1	
Расстояние до системы, кпк	2.08 ± 0.05	
Фотометрический параллакс π , arcsec	0.00048 ± 0.00002	
Возраст системы, млн лет	0 ± 3	

 Таблица 8. Моменты главных минимумов. В столбцах таблицы указаны: (1) — гелиоцентрический момент минимума, (2) — ошибка определения момента минимума ϵ , (3) — остаточное уклонение от решения апсидального вращения $O - C$, (4) — фотометрические полосы, использованные при решении для определения момента минимума

HJD, 2400000+	ϵ	$O - C$	Примечание
(1)	(2)	(3)	(4)
55824.51961	0.00015	0.00124	$UBVRI$
56159.47157	0.00016	-0.00190	$UBVR_cI_c$
58337.60180	0.00250	0.00173	V
58685.50494	0.00100	-0.00205	$UBVR_cI_c$
59007.50507	0.00096	-0.00059	$BVRI$
59035.26554	0.00023	0.00139	R_cI_c
60954.29660	0.00200	0.00015	V

Kravtsova, 2022; Volkov et al., 2025; Volkova et al., 2025).

Наличие противоречий в апсидальном вращении является косвенным подтверждением гипотезы Шакуры. Разумеется, наклон осей вращения компонентов всегда остается под вопросом и, как показано в Volkova and Volkov (2025b), при некоторых условиях может скрыть имеющиеся противоречия в апсидальном вращении.

Таблица 9. Моменты вторичных минимумов. Указаны те же параметры, что и в таблице 8

HJD, 2400000+	ϵ	$O - C$	Примечание
(1)	(2)	(3)	(4)
54942.58466	0.00106	0.00233	$UBVR_cI_c$
55070.26914	0.00200	-0.00243	V
57992.33735	0.00500	0.00619	BV :
59365.46619	0.00271	0.00070	VRI
59774.44561	0.00041	0.00005	$UBVR_cI_c$
60109.40161	0.00200	-0.00070	V
60953.27199	0.00150	-0.00004	V

Для лучшего понимания происходящих процессов необходимы спектральные наблюдения эффекта Маклафлина–Росситера, которые требуют высокого разрешения применяемых спектрографов.

Исследованная нами система GSC 2143 1307 обладает довольно коротким периодом и небольшими относительными размерами орбиты, при этом включает в себя массивные звезды-компоненты. Система представляется крайне интересной с точки зрения наложения ограничений на времена синхронизации, особенно если последующие спектральные наблюдения подтвердят определенные нами значительные массы компонентов.

Таблица 10. Параметры апсидального движения GSC 2143 1307. Приведены следующие параметры: T_0 — юлианская дата, при которой долгота периастро $\omega_0 = 90^\circ$; $P_{\text{ан}}$ — аномалистический период; P_s — сидерический период; e — эксцентриситет орбиты; i — угол наклона орбиты к лучу зрения; $\dot{\omega}$ — скорость апсидального вращения; U — период апсидального вращения; $O - C$ — остаточное уклонение индивидуальных моментов минимумов от найденного решения

Параметр	Значение
T_0 , HJD	$2448503.57545 \pm 0.00003$
$P_{\text{ан}}$, day	$1.850678673 \pm 0.000000005$
P_s , day	$1.850574928 \pm 0.000000005$
e	0.1196 ± 0.0004
i , deg	84.0 ± 0.1
$\dot{\omega}$, deg yr^{-1}	3.982 ± 0.004
U , yr	90.39 ± 0.05
$O - C$, day	0.0016

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ наблюдательных данных открытой нами затменной звезды GSC 2143 1307 позволил впервые получить геометрические и физические параметры звезд-компонентов: температуры $T_1 = 18500 \pm 500$ K, $T_2 = 16200 \pm 500$ K; массы $M_1 = 5.1 \pm 0.5 M_\odot$, $M_2 = 4.2 \pm 0.4 M_\odot$; радиусы $R_1 = 2.55 \pm 0.08 R_\odot$, $R_2 = 2.23 \pm 0.08 R_\odot$.

В ходе многолетних наблюдений удалось с высокой точностью измерить скорость прецессии орбитального эллипса, которая оказалась равна теоретическому значению при условии синхронизма орбитального и вращательных моментов звезд-компонентов, $P_{\text{aps}} = 90.4 \pm 0.05$ лет. Система является важнейшим репером для экспериментальной проверки теорий синхронизации вращения тесных двойных систем.

Обоснована принадлежность GSC 2143 1307 к туманности S 87.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова. Наблюдения получены на телескопах Астробиб RC500 (Кисловодск), Цейсс-600 и Цейсс-1000 (Симеиз), входящих в ЦКП «Терскольская обсерватория» ИНАСАН. В работе использовались база данных SIMBAD Страсбургского центра астрономических данных (Франция),

служба библиографических ссылок ADS (NASA, США). Приносим нашу искреннюю благодарность Л. А. Багаеву, сотруднику Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ, за помощь в наблюдениях. Мы признательны анонимному рецензенту, чьи замечания позволили значительно улучшить статью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Albrecht, S. Reffert, I. A. G. Snellen, and J. N. Winn, *Nature* **461** (7262), 373 (2009). DOI:10.1038/nature08408
2. V. S. Avedisova and G. I. Kondratenko, *Nauchnye Informatsii* **56**, 59 (1984).
3. L. A. Bagaev, I. M. Volkov, and I. V. Nikolenko, *Astronomy Reports* **62** (10), 664 (2018). DOI:10.1134/S1063772918100013
4. S. I. Barabanov, S. A. Potanin, A. D. Savvin, et al., *INASAN Science Reports* **6**, 92 (2021). DOI:10.51194/INASAN.2021.6.3.006
5. M. A. Burlak, I. M. Volkov, and N. P. Ikonnikova, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso* **48** (4), 536 (2018).
6. A. Claret, *Astron. and Astrophys.* **424**, 919 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20040470
7. P. De Cat, *ASP Conf. Ser.*, **259**, 196 (2002).
8. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000). DOI:10.1051/aas:2000126
9. G. M. Green, E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner, et al., *Astrophys. J.* **810**, article id. 25 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/810/1/25
10. K. F. Khaliullin, *Astrophys. J.* **299**, 668 (1985). DOI:10.1086/163732
11. K. F. Khaliullin and V. S. Kozyreva, *Astrophys. Space Sci.* **94** (1), 115 (1983). DOI:10.1007/BF00651762
12. A. I. Khaliullina and K. F. Khaliullin, *Sov. Astron.* **28**, 228 (1984).
13. V. G. Kornilov, I. M. Volkov, A. I. Zakharov, et al., *Trudy Gosudarstvennogo Astronomicheskogo Instituta* **63**, 4 (1991).
14. T. Levi-Civita, *American Journal of Mathematics* **59** (2), 225 (1937).
15. D. I. Martynov and K. F. Khaliullin, *Astrophys. Space Sci.* **71** (1), 147 (1980). DOI:10.1007/BF00646915

16. E. E. Mendoza, Boletín de los Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya **4**, 149 (1967).
17. J. C. Mermilliod, M. Mermilliod, and B. Hauck, Astron. Astrophys. Suppl. **124**, 349 (1997). DOI:10.1051/aas:1997197
18. T. J. Moffett and T. G. Barnes, III, Astron. J. **84**, 627 (1979). DOI:10.1086/112460
19. I. V. Nikolenko, S. V. Kryuchkov, S. I. Barabanov, and I. M. Volkov, INASAN Science Reports **4**, 85 (2019). DOI:10.26087/INASAN.2019.4.2.015
20. R. Paladini, C. Burigana, R. D. Davies, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **397**, 213 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20021466
21. K. Pavlovski, J. Southworth, and V. Kolbas, Astrophys. J. **734** (2), article id. L29 (2011). DOI:10.1088/2041-8205/734/2/L29
22. N. I. Shakura, Sov. Astron. Letters **11** (4), 224 (1985).
23. V. Straižys, *Multicolor Stellar Photometry* (Pachart Pub. House, Tucson, 1992).
24. B. J. Taylor, Astrophys. J. Suppl. **60**, 577 (1986). DOI:10.1086/191098
25. I. Volkov, Peremennye Zvezdy **42** (1), 1 (2022). DOI:10.24412/2221-0474-2022-42-1-7
26. I. M. Volkov, Inform. Bull. Var. Stars **3876**, 1 (1993).
27. I. M. Volkov, Astrophys. Space Sci. **296** (1–4), 105 (2005). DOI:10.1007/s10509-005-4393-3
28. I. M. Volkov, Peremennye Zvezdy **44**, 42 (2024).
29. I. M. Volkov and D. Chochol, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso **43** (3), 419 (2014).
30. I. M. Volkov, D. Chochol, J. Grygar, et al., Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso **47** (1), 29 (2017).
31. I. M. Volkov and K. F. Khaliullin, Inform. Bull. Var. Stars **4680**, 1 (1999).
32. I. M. Volkov and A. S. Kravtsova, Astron. J. **164** (5), id. 194 (2022). DOI:10.3847/1538-3881/ac7d5c
33. I. M. Volkov, S. A. Naroenkov, and A. S. Volkova, Astronomy Reports **69** (2), 118 (2025). DOI:10.1134/S1063772925701550
34. I. M. Volkov and N. S. Volkova, Astronomical and Astrophysical Transactions **26** (1), 129 (2007). DOI:10.1080/10556790701421102
35. I. M. Volkov and N. S. Volkova, Astronomy Reports **53** (2), 136 (2009). DOI:10.1134/S106377290902005X
36. I. M. Volkov, Astronomy Reports **67** (4), 320 (2023). DOI:10.1134/S1063772923040054
37. I. M. Volkov, D. Chochol, and A. S. Kravtsova, Astronomy Reports **61** (5), 440 (2017). DOI:10.1134/S1063772917050109
38. I. M. Volkov and A. S. Kravtsova, Astronomy Reports **66** (6), 466 (2022). DOI:10.1134/S1063772922060063
39. I. M. Volkov, S. A. Naroenkov, and A. S. Kravtsova, Astronomy Reports **68** (5), 472 (2024a). DOI:10.1134/S1063772924050058
40. I. M. Volkov, A. S. Volkova, and L. A. Bagaev, Astronomy Reports **68** (9), 886 (2024b). DOI:10.1134/S1063772924700781
41. I. M. Volkov, A. S. Volkova, and L. A. Bagaev, Astronomy Reports **68** (9), 886 (2024c). DOI:10.1134/S1063772924700781
42. I. M. Volkov, N. S. Volkova, and D. Chochol, Astronomy Reports **54** (5), 418 (2010). DOI:10.1134/S1063772910050057
43. I. M. Volkov, N. S. Volkova, I. V. Nikolenko, and D. Chochol, Astronomy Reports **55** (9), 824 (2011). DOI:10.1134/S1063772911090095
44. A. S. Volkova and I. M. Volkov, Astronomy Reports **69** (6), 480 (2025a). DOI:10.1134/S1063772925701859
45. A. S. Volkova and I. M. Volkov, Astronomy Reports **69** (6), 480 (2025b). DOI:10.1134/S1063772925701859
46. A. S. Volkova and I. M. Volkov, Astronomy Reports **70** (1), 40 (2026). DOI:10.1134/S1063772926700216
47. A. S. Volkova, I. M. Volkov, and S. A. Naroenkov, Astronomy Reports **69** (8), 694 (2025). DOI:10.1134/S1063772925701999
48. R. Xue and Y. Wu, Astrophys. J. **680** (1), 446 (2008). DOI:10.1086/587540

Discovery and Investigation of Massive Eclipsing Binary GSC 2143 1307

A. S. Volkova¹ and I. M. Volkov¹

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

A new eclipsing short-period star with an elliptical orbit GSC 2143 1307 ($V = 14^m24$, $P = 1^d85$, $e = 0.12$, B3 V + B5 V) that we have discovered turned out to be a young massive system with rapid apsidal rotation. The following absolute parameters of the components were obtained for the first time: $T_1 = 18\,500 \pm 500$ K, $M_1 = 5.1 \pm 0.5 M_\odot$, $R_1 = 2.55 \pm 0.08 R_\odot$, $T_2 = 16\,200 \pm 500$ K, $M_2 = 4.2 \pm 0.4 M_\odot$, $R_2 = 2.23 \pm 0.08 R_\odot$. The apsidal period, $P_{\text{aps}} = 90.4 \pm 0.05$ years, corresponds within the error limits to the theoretical value under conditions of synchronism between the orbital and rotational momenta. The distance to the system according to the photometric parallax is $d = 2.08$ kpc.

Keywords: stars: massive, stars: binaries: eclipsing, stars: rotation, stars: individual: GSC 2143 1307